

運動時のエネルギー摂取量の違いが長時間・間欠的運動パフォーマンスおよび筋グリコーゲンに及ぼす影響

大澤拓也

目 次

要約	1
諸言	2
方法	3
結果	7
考察	8
まとめ	11
謝辞	11
参考文献	12
図	14

運動時のエネルギー摂取量の違いが長時間・間欠的運動パフォーマンスおよび筋グリコーゲンに及ぼす影響

大澤拓也 近藤衣美 高橋英幸

要約

運動時のエネルギー摂取により、持久性運動パフォーマンスが向上し、筋グリコーゲン低下が抑制される。しかしながら、間欠的運動時のパフォーマンスや筋グリコーゲンに及ぼす影響、またエネルギー摂取量の違いを検討した研究は少ない。本研究の目的は運動開始前および運動中間のエネルギー摂取量の違いが長時間・間欠的運動パフォーマンスおよび筋グリコーゲンに及ぼす影響を明らかにすることとした。日常的に運動を行っている男性7名(24±3歳)を対象とし、自転車エルゴメータを用いた長時間・間欠的運動を3条件実施した。運動プロトコルはウォーミングアップ運動5分、安静3分の後、全力運動5秒と休息55秒を10回繰り返す運動を4セット(計40回)実施するものとした。セット間の休息は順に2分、10分、2分とした。実験条件は運動開始前および運動中間に水のみ摂取するCON、運動時エネルギー消費量の約50%を摂取するLow-E、同じく90%を摂取するHigh-Eとし、試技の順番はランダムに実施した。運動の前後に、炭素の磁気共鳴分光法により、非侵襲的に筋グリコーゲン濃度を測定した。運動開始前やセット終了ごとに血糖値や血中乳酸濃度の測定を行い、運動中連続して呼気ガスの測定を行った。全力運動時の最高パワー、平均パワーは条件間で有意差は認められなかった。血糖値は有意な交互作用が認められ($P<0.05$)、エネルギー摂取後から1セット後まではHigh-EおよびLow-EがCONよりも高値を示したが、2セット後以降、条件間で類似した変化を示した。また酸素摂取量や呼吸交換比、血中乳酸濃度は運動により有意に変化したものの、条件間で有意差は認められなかった。CONと比較し、筋グリコーゲンの低下率はLow-Eでは有意に低下($P<0.05$)し、High-Eでは低下傾向($P=0.058$)を示した。また、Low-EとHigh-Eでは有意差が認められなかった。本研究の結果、運動開始前および運動中間における糖質によるエネルギー摂取は長時間・間欠的全力ペダリング運動時のパフォーマンスに影響を及ぼさないこと、筋グリコーゲン低下を抑制すること、エネルギー摂取量の違いが及ぼす影響は小さいことが明らかとなった。

代表者所属: 国立スポーツ科学センター スポーツ科学研究部

諸言

我々の日常的な活動や運動では、主に血液や筋などに存在する糖質(血糖, グリコーゲン)や脂質(遊離脂肪酸, 筋内脂肪)をエネルギー源として利用している(Coyle, 1995). これら糖質・脂質の利用割合は運動の強度や継続時間により変化する. 一般に運動強度が高いと糖質の利用割合が増加し, 中程度強度の運動では継続時間が長くなると脂質の利用割合が増加する. また, 糖質・脂質の利用割合は実験時の環境(気温(Febbraia et al. 1994, Nybo et al. 2013) や酸素分圧 (Green et al. 1992, Peronnet et al. 2006)) や前日までの食事 (Foskett et al. 2008, Skein et al. 2012) などによっても大きく変化することが知られている.

エネルギー源としての糖質の特徴として, 有酸素系代謝だけでなく解糖系代謝にも用いられること, 高強度運動時のエネルギー基質のほぼ全てを賄うこと, 脂質と比較して身体内における量が圧倒的に少ないことなどがあげられる. そのため, 身体内, 特に筋内の糖質(グリコーゲン)の低下が疲労を促進させ, 持久性運動パフォーマンスに影響すると考えられている. マラソンのようにおおよそ一定強度で継続する持久性運動に対しても, サッカーなどの球技のように高強度運動(スプリント)と休息を繰り返す間欠的な持久性運動に対しても, 筋グリコーゲンの低下は疲労や運動パフォーマンスに影響しており(Gollnick et al. 1974), 筋グリコーゲンの利用や貯蔵を明らかにすることは実際のスポーツ現場においても大変重要である.

筋グリコーゲン量の低下を抑制するため, 運動数日前より糖質摂取量を増加させ, 運動開始前の筋グリコーゲン貯蔵量を増加させる(グリコーゲンローディング, カーボローディング)研究がこれまで数多く行われている(Foskett et al. 2008, Skein et al. 2012) . これらの研究では, 運動の継続時間や繰り返し回数の増加など, 運動パフォーマンスの向上が報告されている. また, 同一仕事量の比較では, 筋グリコーゲン量は運動開始時だけでなく, 運動後においても対照群よりも高値を示している. 一方, 運動開始前や運動中間に糖質などのエネルギーを摂取する研究も検討されている(Tsintzas et al. 1996, Nicholas et al. 1999, Stellingweff et al. 2007) . それらでは運動継続時間の延長や間欠的運動時の繰り返し回数の増加が報告されているが, 間欠的運動時の発揮パワーに及ぼす影響に関する研究は多いとは言えず, またエネルギー摂取量の違いについて比較した研究は少ない.

これまで、筋グリコーゲン量を測定するためにはバイオプシー法を用いることが多かった。この方法は直接的な測定であるというメリットはあるものの、被験者に痛みを与える、また筋全体を反映していないなどのデメリットも存在する。一方、近年、炭素の磁気共鳴分光法(^{13}C -MRS)を用いて、グリコーゲン量を非侵襲的に測定することが可能となった。 ^{13}C -MRSによる測定は非侵襲的であるというだけでなく、繰り返しの測定が容易であること、測定直後の運動に影響しないこと、測定領域が大きいことなどのメリットがある。特に子供や女性、連日激しい運動を行っているアスリートなど、バイオプシー法に抵抗のあるヒトを対象にできることが大きなメリットと考えられる。

上述のように、運動開始前や運動時における糖質摂取は運動パフォーマンスや筋グリコーゲンに大きな影響を及ぼすが、間欠的運動時にそれらを同時に検討した研究は少なく、また、エネルギー摂取量の違いを比較した研究も少ない。運動開始前や運動中間におけるエネルギー摂取により、運動時におけるパフォーマンスを増加させる(運動後半までパフォーマンスを維持させる)、もしくは筋グリコーゲンの低下(運動時におけるグリコーゲン利用の抑制や休息時におけるグリコーゲン再合成の促進など)が抑制される、または両者が同時に生じる可能性が考えられる。また、エネルギー摂取量が大きいほど、その影響が大きくなる可能性も考えられる。これらを検証するため、本研究では、運動開始前や運動中間におけるエネルギー摂取量の違いが長時間・間欠的運動時におけるパフォーマンスと筋グリコーゲン量に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

方法

1. 被験者

被験者は日常的に運動を行っている若年男性7名であった(アメフト4名、フットサル2名、陸上競技短距離1名)。年齢、身長、体重、体脂肪率はそれぞれ 24 ± 3 歳、 $176 \pm 6\text{cm}$ 、 $72.9 \pm 7.1\text{kg}$ 、 $13.9 \pm 4.1\%$ (平均 \pm 標準偏差)であった。実験実施に先立ち、被験者は口頭と文書による実験の内容、リスクなどの説明を受け、同意書に署名をした。また、心電図検査等のメディカルチェックを受け、健康上の問題が生じていないものを被験者とした。本実験はヘルシンキ宣言に則っており、また国立スポーツ科学センターの倫理審査委員

会の承認に基づいて実施された。

2. 実験デザイン

実験はすべてで4日間であった。

実験初日、¹³C-MRS のファントムを決定するため、3 テスラの超電導磁気共鳴画像(MRI)装置(Magnetom Verio, Siemens 社製, ドイツ)にて、右大腿部の断面画像を撮影した。その後、実験の環境や機器、運動プロトコルに慣れるため、全力ペダリング運動を数回、実施した。

2日目から4日目まで、自転車エルゴメータ(Excalibur Sport, ロード社製, オランダ)を用いた長時間・間欠的全力ペダリング運動(2-3 参照)を実施した(図 1)。運動前、¹³C-MRS による筋グリコーゲン測定および肘正中皮静脈より採血を行った。また、運動終了5分後に肘正中皮静脈より採血、30分後に筋グリコーゲン測定を実施した。実験中、糖質・水分摂取時の一部時間を除き(4. 測定項目参照)、連続して呼気ガスと心拍数の測定を行った。運動前、休息時、終了時に指尖より採血を行った。

被験者には、前日の激しい運動は控えること、前日の食事は3条件で類似した通常通りの食事を摂取することを指示した。また、起床は6:00ごろ、運動開始は10:50とし、前日夕食後から実験開始まで水以外の摂取を制限した。実験環境は21°Cに設定された室内において実施した。

実験は3条件あり、運動時のエネルギー消費量の約50%を摂取する低エネルギー摂取条件(Low-E:糖質 67.5g, たんぱく質 0g, 脂質 0g, エネルギー270kcal)、約90%を摂取する高エネルギー摂取条件(High-E:糖質 124g, たんぱく質 0g, 脂質 0g, エネルギー497kcal)、エネルギーを摂取せず、水のみを摂取するコントロール条件(CON:糖質 0g, エネルギー0kcal)とした。Low-EとHigh-Eでは、市販されている飲料を用い、糖質の主な成分はデキストリンであった。両条件で摂取したエネルギー飲料は同一重量(270g)とし、全重量の2/3(180g)をウォーミングアップ運動開始12分前に、残り1/3(90g)を運動中間(2セット目終了4.5分後から5.5分後)に摂取した。また、CONではプラセボは用いなかった。実験の順序はランダムとし、各実験は3日間以上の間隔をあけて実施した。

3. 運動プロトコル

被験者は実験室移動後、30分以上の安静を保った後、運動を実施した。運動プロトコルを図2に示す。ウォーミングアップ運動(仕事量:2W/kg 体重, ペダル回転数:80回転/分)5分間, 安静3分間の後, 長時間・間欠的全力ペダリング運動を実施した。運動は空こぎ(0W ペダリング, ペダル回転数:80回転/分)50秒間, 安静5秒間, 全力ペダリング5秒間(負荷:0.075kp/kg 体重)で構成され(1分間), その10回の繰り返しを1セットとし(10分間), 4セット実施した(合計40回の全力ペダリング)。セット間の休息は2分間, 10分間, 2分間とし, 2セット終了4分後から8分後まで, CONでは水分摂取, Low-EおよびHigh-Eでは実験条件に従った糖質および水分を摂取した。

被験者は空こぎ時, 自転車エルゴメータのサドル上に座りペダリングを行った。全力ペダリング運動5秒前より, 右ペダルを前方に固定した立位安静姿勢を保ち, 測定者のカウントダウンに合わせて, ペダリングを開始し, 測定者の合図まで立位姿勢で全力運動を5秒間実施した。

自転車エルゴメータのハンドル・サドル位置は実験を通して被験者ごとに固定し, 3条件とも同一姿勢で行われた。

4. 測定項目

1) 運動パフォーマンス

自転車エルゴメータより外部出力されたデータより, 全力ペダリング運動時の最高パワーおよび5秒間の平均パワーを算出した。本稿では, それらを1セット毎, および全40回の平均を被験者毎に算出した。

2) 呼気ガス・心拍数

呼気代謝モニタシステム(エアロモニタ AE-310s, ミナト医科学株式会社, 日本)を用いて, 呼気ガスを breath-by-breath 法により測定し, 酸素摂取量と呼吸交換比を算出した。各実験の前, 呼気代謝モニタシステムのフローセンサおよびガスメータの校正を行った。携帯型心拍計(RS800CX, ポラール社製, フィンランド)を用いて, 心拍数を5秒ごとに計測した。

被験者は運動前より終了1分後まで呼気ガス解析用のマスクを装着した。しかし, 水やエネルギーの

摂取のため、2セット目終了4分後より8分後までマスクを外し、呼気ガス解析は実施しなかった。

呼気ガスおよび心拍数のデータは1分毎の平均値で示しており、本運動時においても、空こぎ50秒、安静5秒、全力ペダリング運動5秒の1分間全てを含めた平均値を示している。

3) 血糖値・血中乳酸濃度

指先からの微量採血により、簡易型測定器を用いて、血糖値(メディセーフフィット, テルモ株式会社, 日本)および血中乳酸濃度(BIOSEN 5040, EKF, ドイツ)を測定した。血糖値の測定は糖質摂取前, 糖質摂取後(ウォーミングアップ運動前), ウォーミングアップ運動後, 1セット後, 2セット後, 3セット後, 4セット後に実施した。CONでは糖質摂取を行わないため, 糖質摂取前の測定は行わなかった。血中乳酸濃度は3条件とも, CONの血糖値測定と同様のタイミングで実施した。

4) 遊離脂肪酸・各種ホルモン

運動前および運動終了5分後に, 肘正中皮静脈より採血を行った。遊離脂肪酸, インスリン, 成長ホルモンの測定のため, 血液をシリコン入り真空採血管に採取し, 転倒混和・遠心分離(4°C, 3000回転/分, 10分間)後, 血清成分を別容器に移し冷蔵保存した。アドレナリンおよびノルアドレナリンの測定のため, 血液はEDTA入り真空採血管に採取し, 転倒混和・遠心分離(4°C, 3000回転/分, 10分間)後, 血漿成分を別容器に移し凍結保存した。分析は検査会社に委託した。

5) 筋グリコーゲン

運動前および運動終了30分後に, ^{13}C -MRSを用いて, 右外側広筋中央部よりグリコーゲン濃度を測定した。被験者はMRI装置内で仰臥位になり, 直径10cmの ^{13}C - ^1H 表面コイルを右外側広筋中央部に装着し, ^{13}C -MRSスペクトルを収集した(繰り返し時間:200ミリ秒, データポイント:2048, スペクトル幅:20000Hz, 積算回数:4500回, WALTZ4プロトンデカップリング, 核オーバーハウザー増強(NOE))。1回の測定は15分であった。収集したデータは120mmol/Lのファントムデータとの比較を行い, 筋グリコーゲン濃度を算出した。なお, ファントムサイズは実験初日に撮影された大腿部断面画像より被験者

毎に決定した。

5. 統計解析

全てのデータは平均値±標準偏差で表した。統計解析はSPSS(Ver. 19, IBM, アメリカ)を用いて、4セットを平均した運動パフォーマンス、グリコーゲン低下率の解析には一元配置分散分析を行い、またそれら以外の解析には二元配置分散分析を行った。条件間に有意差が認められた場合、その後の検定として多重比較検定(Bonferroni)を行った。有意水準を5%とした。

結果

1. 運動パフォーマンス

間欠的全力ペダリング運動時の最高パワーおよび5秒間の平均パワーを図3に示した。セット毎の平均値の比較(図3-A・B)においても、全40回の平均値の比較(図3-C・D)においても有差は認められなかった。

2. 呼気ガス・心拍数

酸素摂取量、呼吸交換比、および心拍数の継時的変化を図4に示した。値は1分間の平均であり、運動時(例:10分目から19分目)の値には50秒間の空き、5秒間のCON、5秒間の全力ペダリング運動の全てが含まれている。CONと比較し、糖質を摂取したHigh-E、Low-Eでは、酸素摂取量・呼吸交換比ともやや高い値を示したが、統計学的に有意差は認められなかった。

3. 血糖値・血中乳酸濃度

血糖値の変化は3条件間で有意な交互作用が認められた(図5, $P < 0.05$)。Low-EやHigh-Eでは、糖質摂取によりウォームアップ終了後、つまり全力ペダリング開始前まで血糖値は増加した。CONとの比較においても、1セット後まで高い値を示している。また、糖質摂取量の大きいHigh-Eのほうが

Low-E よりも高値を示したが、2 セット後にはほぼ同じ値を示した。さらに、3 セット開始前に糖質を摂取しているにもかかわらず、3 セット後、4 セット後の血糖値は条件間で有意差は認められなかった。一方、血中乳酸濃度は 3 条件とも時間の経過に伴い有意に増加した($P<0.05$)ものの、3 条件とも類似した変化を示した。

4. 遊離脂肪酸・ホルモン

運動前後の比較において、遊離脂肪酸は 3 条件とも有意な変化を示さなかった(図 6A)。インスリン、成長ホルモン、アドレナリン、ノルアドレナリンは 3 条件とも運動後に有意に増加した($P<0.05$)が、条件間で有意差は認められなかった。

5. 筋グリコーゲン

運動前および運動後の ^{13}C -MRS スペクトルの一例を図 7. に示した。筋グリコーゲンシグナルは 100.5ppm に検出され、運動後に低下した。

運動前・後の筋グリコーゲン濃度、およびその低下率を図 8 に示した。運動により、筋グリコーゲン濃度はいずれの被験者、いずれの条件においても低下した。筋グリコーゲン低下率は個人差がみられ、同一条件においても被験者間で最大 30%程度の差がみられた。また、筋グリコーゲン低下率は条件間に有意差($P<0.05$)が認められ、CON に対して、Low-E は有意に低い値($P<0.05$)を示し、High-E は低い傾向($P=0.058$)を示した。しかしながら、糖質摂取量の異なる Low-E と High-E の比較では、それぞれの低下率に有意差は認められなかった。

考察

本研究では、運動開始前や運動中間に糖質によるエネルギー摂取を行い、長時間(40 分間)・間欠的全力ペダリング運動時の発揮パワー、および筋グリコーゲン低下にどのような影響を及ぼすのか、またエネルギー摂取量の違いがこれらにどのように影響するのかについて検討した。運動時のエネルギー源となりや

すい糖質を経口摂取したことから、本研究のような長時間・間欠的運動においては運動パフォーマンスが向上すること、筋グリコーゲン低下が抑制されること、またはその両者が生じる可能性が考えられた。本研究の結果、運動パフォーマンスは変化せず、筋グリコーゲン低下が抑制されること、またエネルギー摂取量の違いが運動パフォーマンスや筋グリコーゲン低下に対して及ぼす影響は小さいことが示唆された。本研究と同様、運動開始前や運動中間などに、水分摂取だけでなく、エネルギー摂取を行うスポーツ種目は少なくない。本研究は実験室で行われたものの、実際のスポーツ現場に応用できる有用な情報になりうると考えられる。

本研究では、CON においてプラセボを摂取させることができなかった。しかしながら、パフォーマンスに有意差が生じなかったことから、心理的なマイナス要因を引き起こさなかったと考えられる。また、筋グリコーゲン濃度の測定は運動直後でなく 30 分後に実施した。筋グリコーゲン濃度が大きく低下した場合、糖質の摂取がなくとも一定量回復する(Price et al. 1994)が、全実験において、同一タイミングに筋グリコーゲン濃度を測定するため、運動終了 30 分後から筋グリコーゲン測定を開始することとした。

運動開始数分前から数時間前、および運動時に糖質などのエネルギーを経口摂取させ、パフォーマンスを評価した研究は多い。Nicholas et al. (1999) のスプリントを含む間欠的運動(ラフバラ間欠的シャトルランテスト)時に糖質を摂取させた結果、運動実施回数が増加したこと、筋グリコーゲン低下が抑制されたことを報告している。本研究ではパフォーマンスは変化しなかったが、それはパフォーマンスの評価方法の違い、つまり試行回数と発揮パワーが関係していると考えられる。また、Tsintzas et al. (1996)は最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)の 70%強度の持続的なランニングを行わせた結果、同一時間(平均 104 分)の比較では糖質摂取により筋グリコーゲン低下が抑制されたこと、また運動持続時間は延長したと報告している。同様に、Stellingwertt et al. (2007)は約 63% $\dot{V}O_{2max}$ 強度の自転車ペダリング運動 3 時間実施後の筋グリコーゲン低下が抑制されたことを報告している。このように、運動開始前や運動時の糖質摂取は同一時間、同一仕事量時の筋グリコーゲン低下を抑制させ、持久性運動パフォーマンス(運動実施回数や運動持続時間)を向上させる。本研究において、最高パワーおよび平均パワーは条件間で有意差が認められなかったが、筋グリコーゲンの低下率が抑制されたことから、運動回数がより多い、または休息時間がより短いなどの実験条件であれば、糖質摂取の有無や糖質摂取量の違いが運動パフォーマンスにより強く影響した可能性も考

えられる。

運動時の主なエネルギー源は血液中のグルコース(血糖), 遊離脂肪酸, 筋グリコーゲン, 筋内脂肪であり, それらを運動前より変化させ, 運動パフォーマンスや筋グリコーゲン利用に及ぼす影響を調べた研究は多く存在する. 特に運動 1 日前から数日前より糖質摂取量を増加させ, 運動前の筋グリコーゲン量を増加させるグリコーゲン(またはカーボ)ローディングの研究は古くよりみられる. 運動 1 日前からの糖質摂取増加により運動前の筋グリコーゲン量が増加し, その結果, 間欠的運動パフォーマンスや運動終了時の筋グリコーゲン量が増加したとする研究(Skein et al. 2012)がある一方, 糖質摂取増加により間欠的運動パフォーマンスは向上するものの, 運動前・後の筋グリコーゲン量はほとんど変化しないという研究(Foskett et al. 2008)も報告されており, 糖質摂取と運動パフォーマンス, 筋グリコーゲン量との関係は必ずしも一致した見解が得られていない. また, 脂質摂取量を増加させるファットローディング(Zehnder et al. 2006)や遊離脂肪酸の利用制限(van Loon et al. 2005)などを行った研究においても, 脂質利用変化が運動時の筋グリコーゲンなどの糖質利用に与える影響は十分に検討されているとは言えない. また, 呼気ガスから算出される糖質・脂質代謝は血液・筋, 両者のエネルギー基質全体を反映しており, それぞれの変化も異なることから, 呼気ガスから筋内エネルギー基質の変化を捉えることは困難である. 本研究では, 酸素摂取量や呼吸交換比は条件間で有意差が認められなかったが, ^{13}C -MRS により糖質摂取が筋グリコーゲン低下を抑制させることが明らかとなった. つまり, 身体全体の代謝を反映する呼気ガスでは捉えられない変化を ^{13}C -MRS や血液解析により評価することができたと考えられる.

本研究では, 運動による筋グリコーゲンの変化を評価している. 実験中, グリコーゲンの利用は亢進しているが, 安静時や空こぎ時などにグリコーゲンの再合成が増加されている可能性もある. 従って, 本結果における運動前後での筋グリコーゲン濃度の変化は利用と再合成のバランスを反映していると考えられる. エネルギー摂取条件(Low-E および High-E)での筋グリコーゲン低下率の抑制という本結果は, 血糖利用増加による筋グリコーゲン利用低下が大きく影響していると考えられるものの, 筋グリコーゲン再合成も少なからず関係していると考えられる.

これまでの筋グリコーゲンに関する研究の多くはバイオプシー法を用いて測定していた. この方法は直後の運動に影響を及ぼす可能性があるため, 運動前の測定は前日や数日前に実施することも多く, また実

験が2条件以上ある場合、運動前の値(ベース値)は1条件目の数日前に実施するのみで、全条件で行われない研究 (Nybo et al. 2013)もみられる。本研究は非侵襲的な¹³C-MRSでの測定であることから、全ての条件で運動前の測定を実施した。前日の食事や運動を制限したにもかかわらず、運動前の値は条件間で有意差はないものの、各被験者内で日差変動がみられた。上述のように、運動前の筋グリコーゲン量は運動時の利用や回復時の合成に関係することから、運動前の値を評価することは重要であると考えられる。

まとめ

本研究では、運動開始前および運動中間の糖質によるエネルギーの経口摂取が長時間・間欠の全力ペダリング運動時における運動パフォーマンス、および筋グリコーゲン低下に及ぼす影響、またエネルギー摂取量の違いについて検討した。その結果、エネルギー摂取は運動時の発揮パワーなどの運動パフォーマンスに影響を及ぼさないこと、筋グリコーゲンの低下を抑制すること、エネルギー摂取量の違いが運動パフォーマンスや筋グリコーゲン低下に及ぼす影響は小さいことが示唆された。本研究では、運動時の発揮パワーや疲労と関係の深い筋グリコーゲン量を評価していること、実際のスポーツ現場で行われている運動開始前や運動中間のエネルギー摂取の影響を検討していることなどから、本結果は競技力や運動パフォーマンスの向上に繋がる有益な知見であると考えられる。

謝辞

本研究は一般財団法人上月財団の第10回スポーツ研究助成事業の援助により行われました。ここに記して、深謝の意を表します。また、40回のスプリント運動を全力で実施してくれた全ての被験者に感謝いたします。

参考文献

- Coyle EF. Substrate utilization during exercise in active people. *Am J Clin Nutr.* 61, 968S–79S, 1995
- Febbraio MA, Snow RJ, Stathis CG, Hargreaves M, Carey MF. Effect of heat stress on muscle energy metabolism during exercise. *J Appl Physiol.* 77, 2827–31. 1994
- Foskett A, Williams C, Boobis L, Tsintzas K. Carbohydrate Availability and Muscle Energy Metabolism during Intermittent Running. *Med Sci Sports Exerc.* 40, 96–103. 2008
- Gollnick PD, Piehl K, Saltin B. Selective glycogen depletion pattern in human muscle fibres after exercise of varying intensity and at varying pedalling rates. *J Physiol.* 241, 45–57. 1974
- Green HJ, Sutton JR, Wolfel EE, Reeves JT, Butterfield GE, Brooks GA. Altitude acclimatization and energy metabolic adaptations in skeletal muscle during exercise. *J Appl Physiol.* 73, 2701–8. 1992
- Nicholas CW, Green PA, Hawkins RD, Williams C. Carbohydrate–electrolyte ingestion during intermittent high–intensity running. *Int J Sport Nutr.* 7, 251–60. 1997
- Nybo L, Girard O, Mohr M, Knez W, Voss S, Racinais S. Markers of Muscle Damage and Performance Recovery after Exercise in the Heat. *Med Sci Sports Exerc.* 45, 860–8. 2013
- Péronnet F, Massicotte D, Folch N, Melin B, Koulmann N, Jimenez C, Bourdon L, Launay JC, Savourey G. Substrate utilization during prolonged exercise with ingestion of ¹³C–glucose in acute hypobaric hypoxia (4,300 m). *Eur J Appl Physiol.* 97, 527–34. 2006
- Price TB, Rothman DL, Taylor R, Avison MJ, Shulman GI, Shulman RG. Human muscle glycogen resynthesis after exercise: insulin–dependent and –independent phases. *J Appl Physiol.* 76, 104–11. 1994
- Skein M, Duffield R, Kelly BT, Marino FE. The effects of carbohydrate intake and muscle glycogen

content on self-paced intermittent-sprint exercise despite no knowledge of carbohydrate manipulation.

Eur J Appl Physiol. 112, 2859-70. 2012

- Stellingwerff T, Boon H, Gijsen AP, Stegen JH, Kuipers H, van Loon LJ. Carbohydrate supplementation during prolonged cycling exercise spares muscle glycogen but does not affect intramyocellular lipid use. Pflugers Arch. 454, 635-47. 2007
- Tsintzas OK, Williams C, Boobis L, Greenhaff P. Carbohydrate ingestion and single muscle fiber glycogen metabolism during prolonged running in men. J Appl Physiol. 81, 801-9. 1996
- van Loon LJ, Thomason-Hughes M, Constantin-Teodosiu D, Koopman R, Greenhaff PL, Hardie DG, Keizer HA, Saris WH, Wagenmakers AJ. Inhibition of adipose tissue lipolysis increases intramuscular lipid and glycogen use in vivo in humans. Am J Physiol Endocrinol Metab. 289, E482-93. 2005
- Zehnder M, Christ ER, Ith M, Acheson KJ, Pouteau E, Kreis R, Trepp R, Diem P, Boesch C, Décombaz J. Intramyocellular lipid stores increase markedly in athletes after 1.5 days lipid supplementation and are utilized during exercise in proportion to their content. Eur J Appl Physiol. 98, 341-54. 2006



図1. 運動の様子

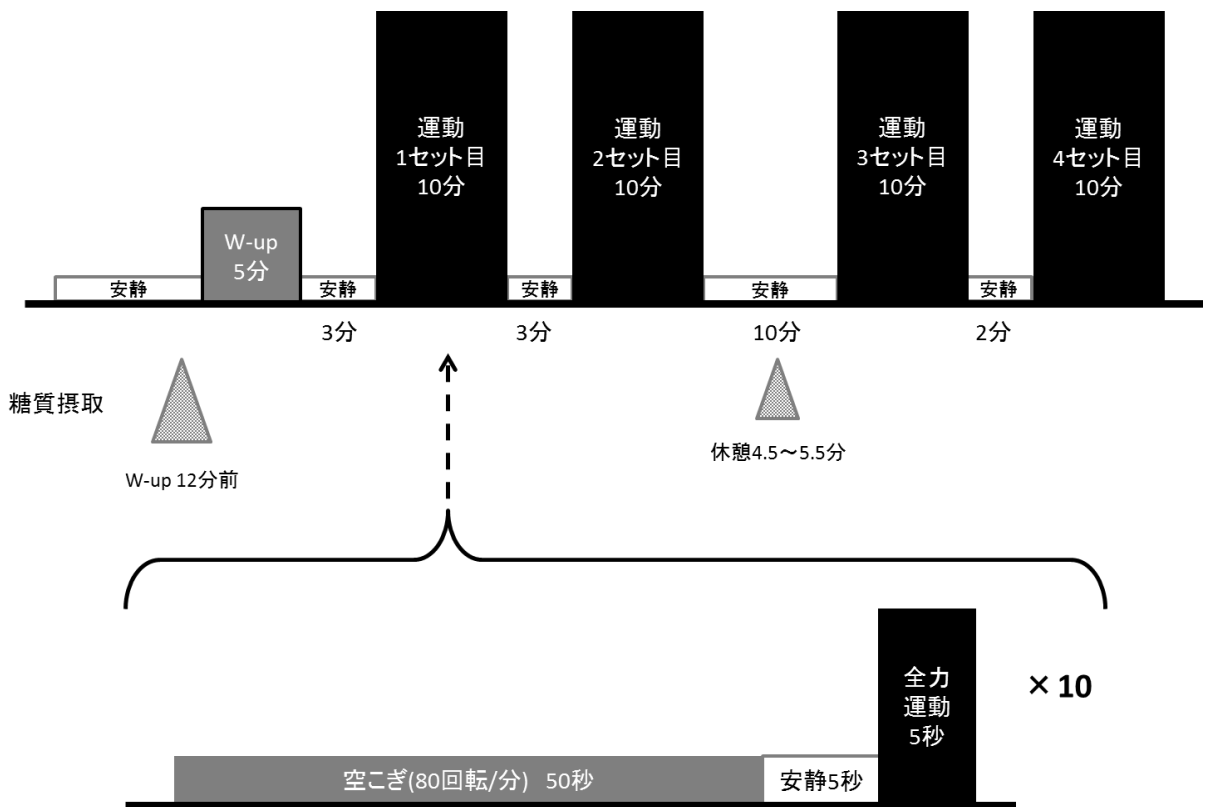


図2. 運動プロトコル (w-up: ウォーミングアップ運動)

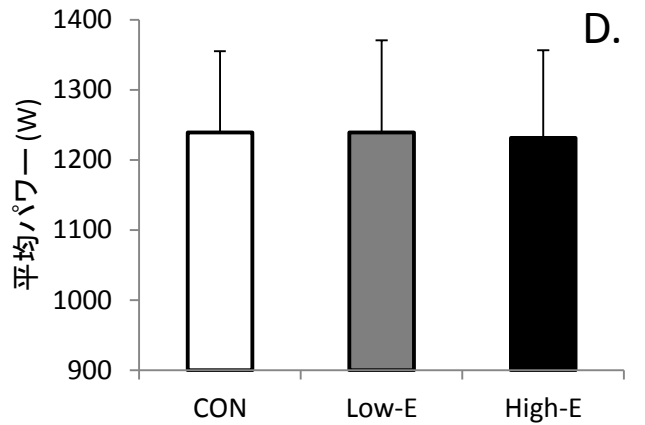
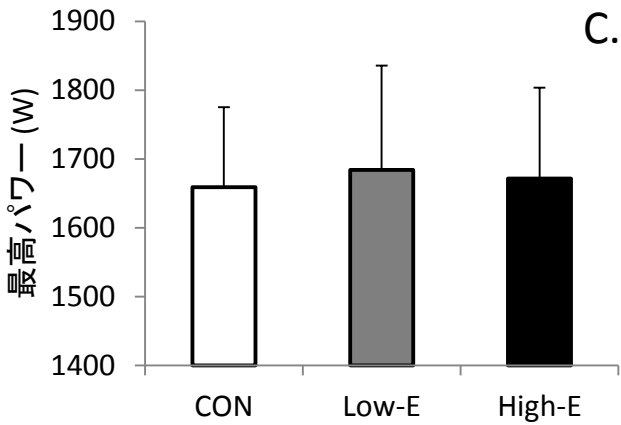
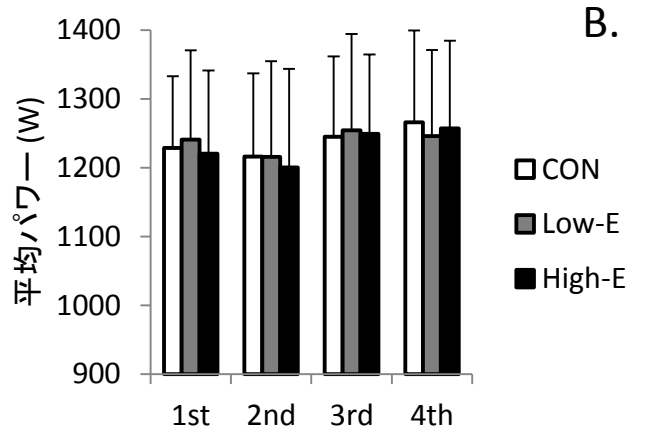
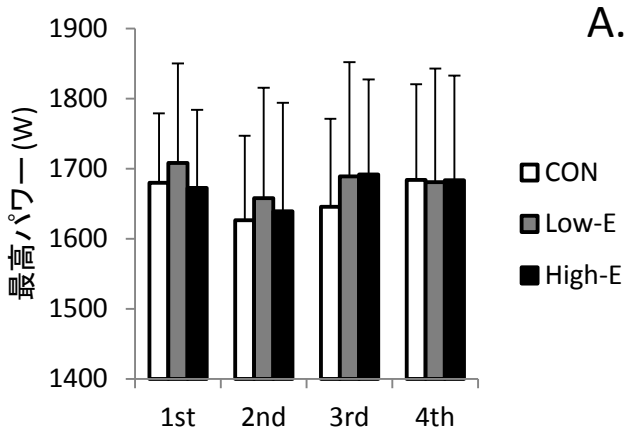


図3. 全カペダリング運動時の最高パワー(A,C)および平均パワー(B,D)
(A,Bはセットごとの平均、C,Dは全運動の平均を示す。)

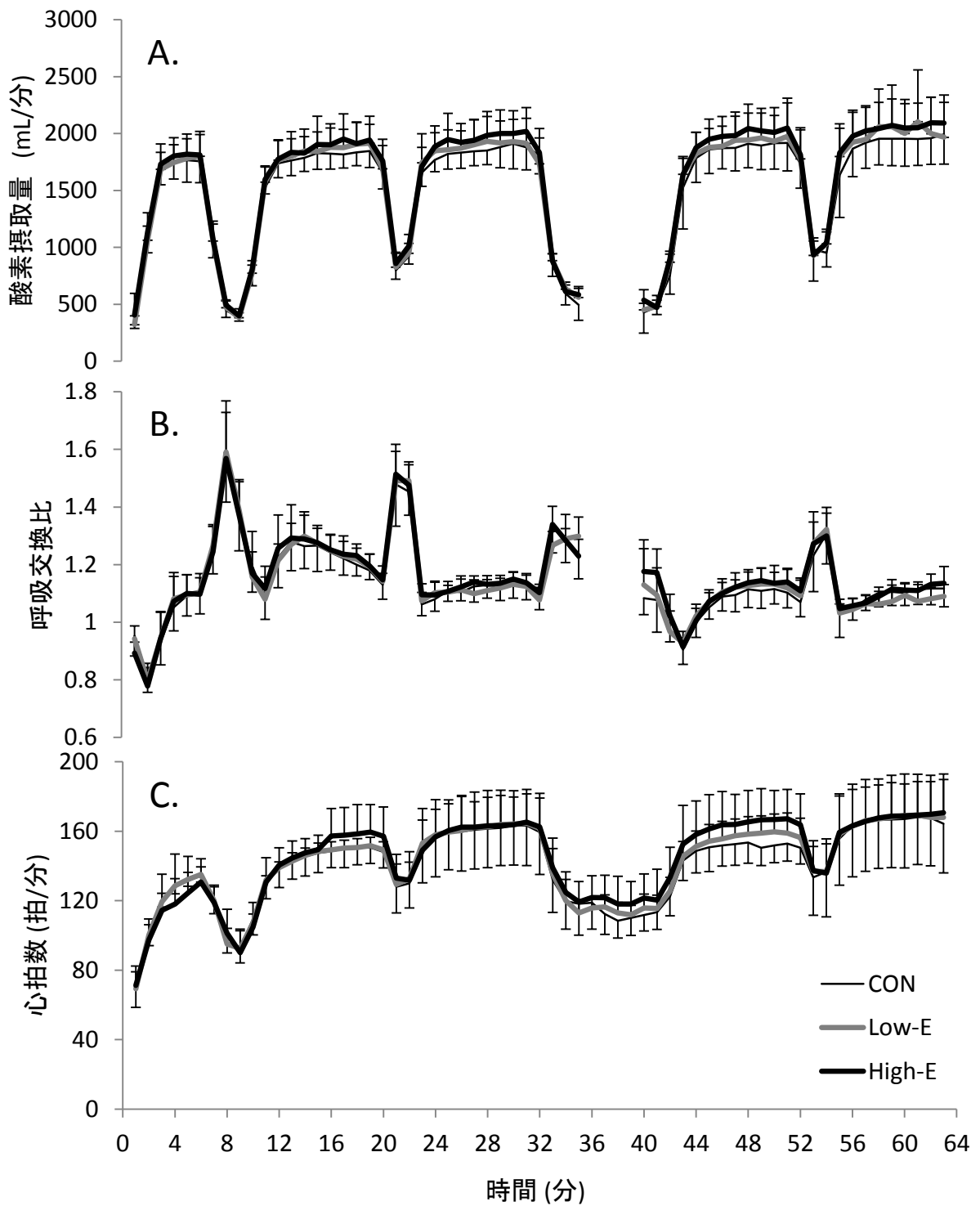


図4. 酸素摂取量(A)、呼吸交換比(B)、心拍数(C)の変化
(36分目から39分目までは呼気ガス解析を行っていない。)

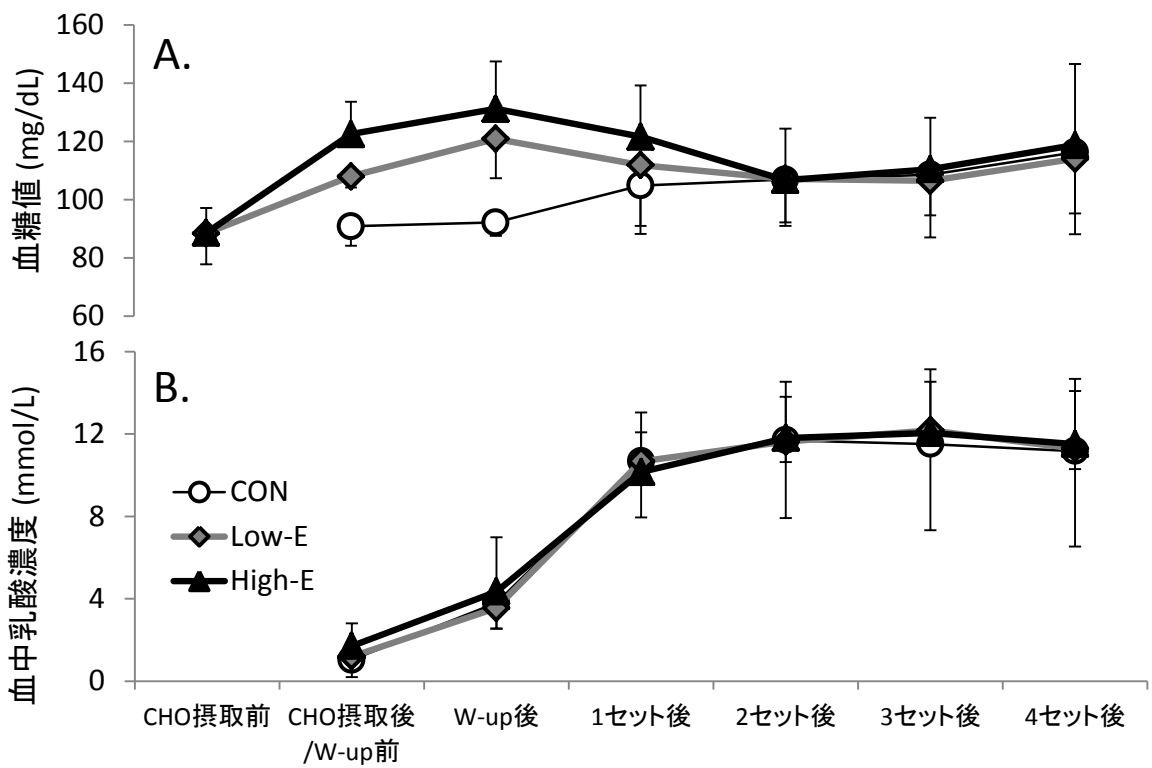


図5. 血糖値(A)および血中乳酸濃度(B)の変化
CHO: 糖質、W-up: ウォーミングアップ

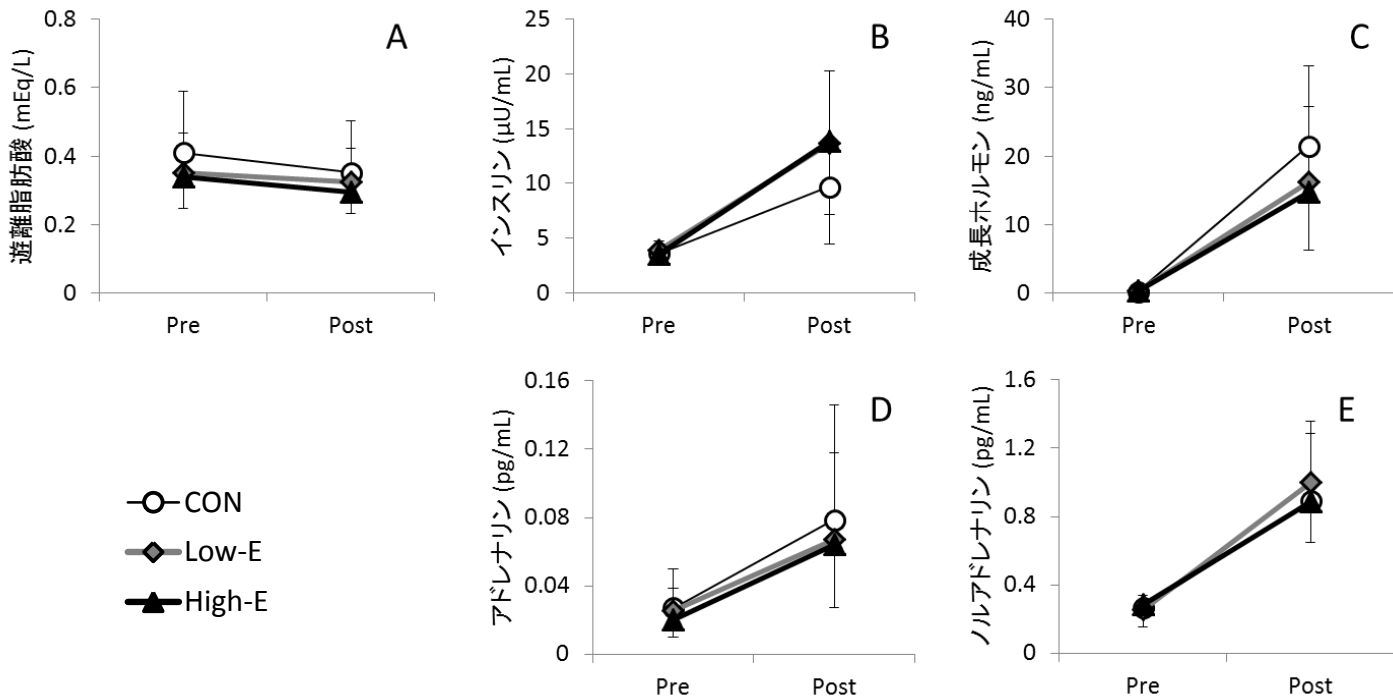


図6. 遊離脂肪酸(A)、インスリン(B)、成長ホルモン(C)、アドレナリン(D)、ノルアドレナリン(E)の運動前(Pre)と運動後(Post)の比較

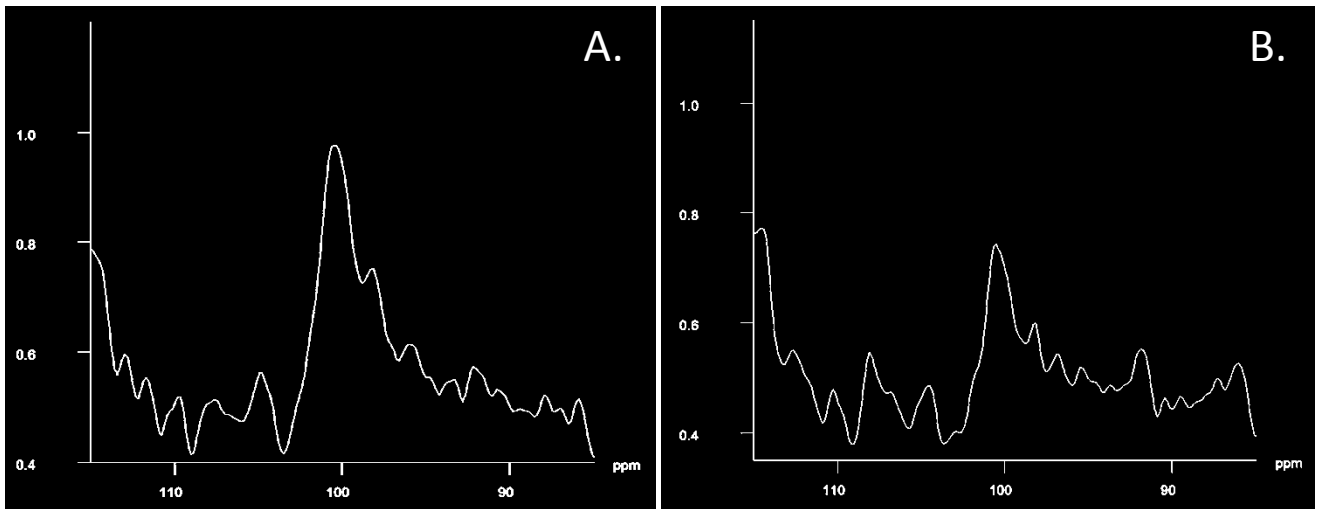


図7. ^{13}C -MRSスペクトルの変化の一例 (A: 運動前, B: 運動後)

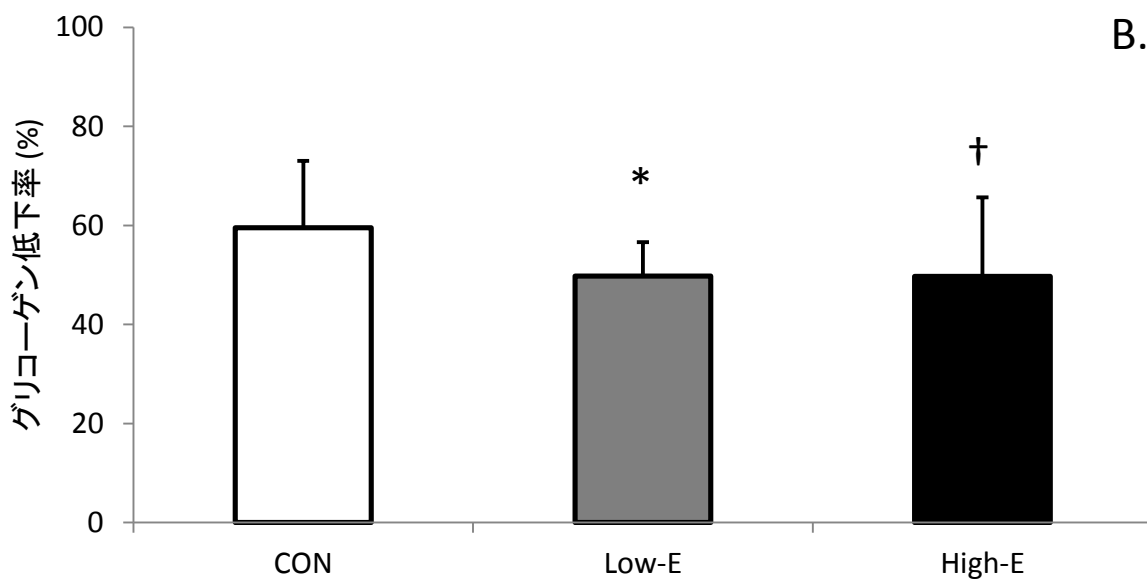
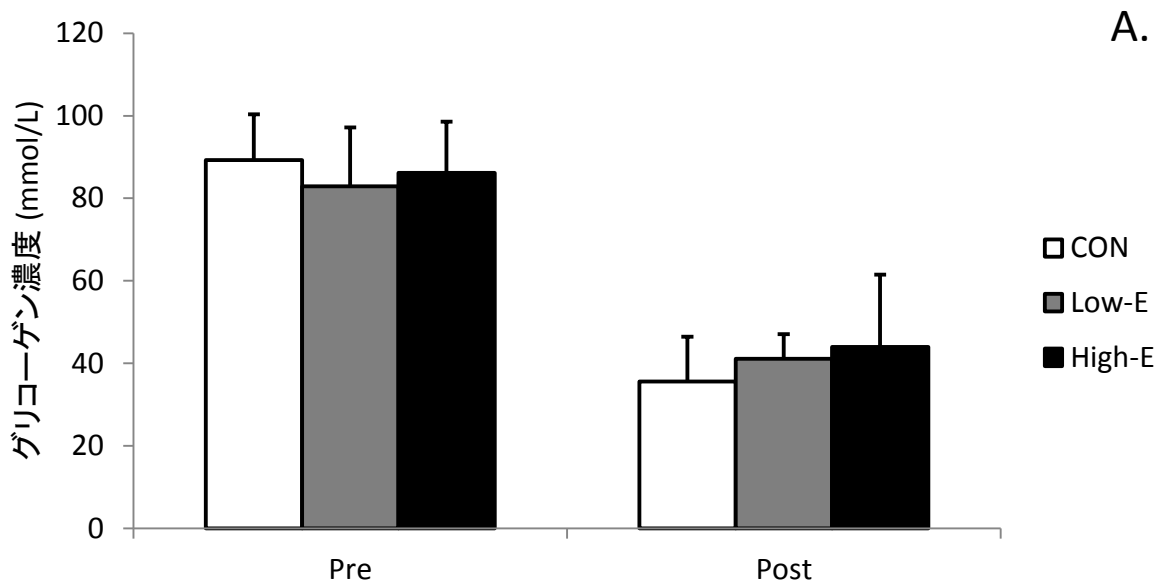


図8. 運動前(Pre)と運動後(Post)におけるグリコーゲン濃度(A)およびグリコーゲン低下率(B)。グリコーゲン低下率はCONと比較し、Low-Eでは有意に低値を示し(*: $P < 0.05$)、High-Eでは低い傾向を示した(†: $P = 0.058$)。